

自動化水準の異なる下肢運動に対する上肢運動の干渉

外山 寛・藤原 勝夫

Interference of upper limbs exercise to lower limbs exercise with different automatic levels

Hiroshi Toyama and Katsuo Fujiwara

Abstract

The voluntary exercise consists of different automatic levels. Most of which are a combination of the upper limbs and the lower limbs exercises.

This study was to examine the interference of the upper limbs exercise to the lower limbs exercise with different automatic levels. The subjects were 7 male university students, aged 19 and 20. The lower limbs exercises were the stepping (walking on the place) and the right and left foot alternate plantar-flexion. Both exercises were done standing. The stepping exercise is ordinarily performed as an automatic act in walking or running. The plantar-flexion is not ordinary and it will be no more automatic than stepping. One upper limbs exercise, simultaneously tapping both hands, was combined with the lower limbs exercise. The interference degree was evaluated by the changes of step intervals of the lower limbs exercise. The results were summarized as follows :

1) For a great number of the subjects, doing the lower limbs exercise, the changes of step intervals on the plantar-flexion were greater than the changes on the stepping exercise.

2) For a great number of the subjects, the interference of the upper limbs exercise (tapping) to the lower limbs exercise was greater on the plantar-flexion than the interference on the stepping exercise.

3) When the tapping was combined with the plantar-flexion, one step interval at that time was lengthened and one step interval immediately before the tapping was shortened.

The above mentioned findings suggest that the automatic level of the plantar-flexion is less than the automatic level of the stepping exercise, and that the lower limbs exercise with lower automatic level has greater interference of the upper limbs exercise.

I 結 言

スポーツ場面における動作には、体を移動させながらボールやラケットをコントロールするなど上肢と下肢の運動を組み合わせる局面が多く含まれている。随意運動はこのような上肢と下肢の動作を組み合わせる以外にも体幹や左右部位などを併わせてコントロールし、目的とする運動を完成させている。体の左右部位を組み合わせた運動においてそれぞれの運動の正確性や¹⁰⁾最大筋力が低下したり¹²⁾¹³⁾¹⁶⁾¹⁸⁾、反応が遅くなること¹⁾²⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾が報告されている。そしてこれらの現象はトレーニングにより改善されることも報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。ヒトの運動の特性として、多くの運動が四足運動と比較して物理的に不安定な立位姿勢のもとで行われていることがあげられる。そして下肢は体を支えるという機能が基本となり、上肢は姿勢の保持から解放され、多様な作業動作を行うことが基本的機能となっている。このようにヒトは機能分化した上肢と下肢を組み合わせた随意運動を行うという大きな特性を有する。したがって、上肢と下肢の運動を組み合わせた場合の調節様式を検討することは、ヒトの随意運動の調節機序を理解する上で重要と思われる。

随意運動には意識を集中しなければ行えないものと、長時間無意識的に行えるものがある。意識するということは、フィードバックされた体性感覚が知覚され、随意的に運動の調節がなされているということである。意識外にある時間が長いということは、この体性感覚が知覚されず、反射的に運動の調節がなされているということ、あるいは過去の記憶をもとに事前に運動の終了までの過程がプログラムされている（フィードフォワード）ということである。このような運動を自動化された運動と定義したい。自動化水準の異なる運動の調節様式を比較することは、体性感覚の使用法や大脳皮質の役割を検討する上で重要である⁸⁾⁹⁾。自動化されていない運動をより自動化された運動へと変化させていく過程が運動学習の一側面であり、スポーツ技術の習得と深いかわりがあると考えられる。例えば歩きながら手で他の動作を行なっても下肢の動作は乱れないが、意識の集中を必要とするような下肢の運動を行っている場合に手で他の動作を行うと下肢の動作が中断するといった事が観察される。

そこで本研究は、下肢の運動について自動化水準が異なると思われる2つの運動を取り上げ、上肢運動を組み合わせた場合の下肢運動への干渉の程度を下肢運動のテンポの変動から検討した。

II 方 法

被験者は男子大学生7名である。その身体特性を表1に示した。これらの被験者は、日頃特別なトレーニングを行っていない学生である。

下肢の運動は自動化されていると思われる運動として、図1に示した立位での足ふみ運動とした。この運動は歩行やランニング時の下肢の動作であり、無意識的に運動が行え自動化されていると考えられる。足ふみ運動に比べて自動化されていないと考えられる下肢の運動として

Table 1 Physical characteristics of the subjects

	Age (yrs.)	Body Height (cm)	Body Weight (kg)
M. N.	19	170.0	70.0
S. N.	19	170.0	61.0
T. Y.	19	169.0	55.0
K. O.	19	165.0	63.0
S. A.	20	172.0	67.5
K. K.	19	163.5	45.0
Y. Y.	19	178.0	69.0

は、図2に示した立位での左右脚交互の底屈運動を用いた。足関節のみを動かす底屈運動は不断行うことが少ない。足ふみ運動と底屈運動に組み合わせる上肢の運動は、肘関節90°屈曲位で1回の両手掌同時タッピングとした。本実験で行った運動は、足ふみ運動、底屈運動、足ふみ運動と上肢タッピングの組み合わせ運動(以下、足ふみ・タッピング運動とする)、底屈運動と上肢タッピングの組み合わせ運動(以下、底屈・タッピング運動とする)の4種類である。下肢運動の速さは、毎分120テンポ、160テンポ、200テンポ(1テンポの時間間隔はそれぞれ500msec., 375msec., 300msec.)の3種類とした。これらの速さはほぼ歩行、ジョギング、全力疾走を行っている場合の下肢のテンポに相当する。測定の手順は、はじめに足ふみ運動と底屈運動を交互に各々7回実施し、その後足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動を交互に各々7回実施した。測定はすべて1分間の休憩をおいて行った。1回の測定の実施内容は図3に示した。すなわち、まず被験者に下肢運動のテンポを把握させるため、5秒間メトロノーム

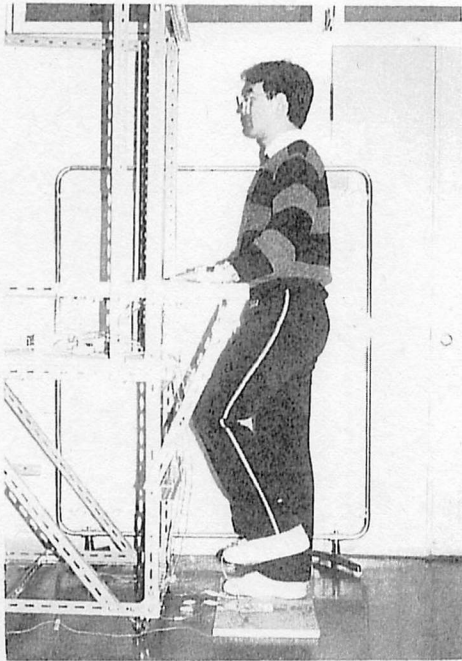


Fig. 1 Stepping exercise

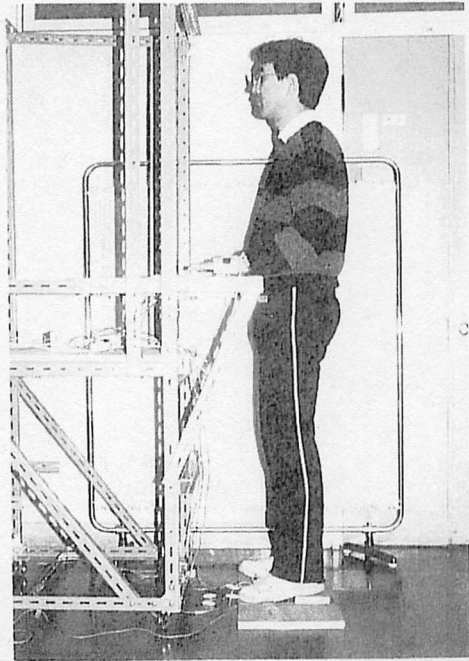


Fig. 2 Plantar-flexion

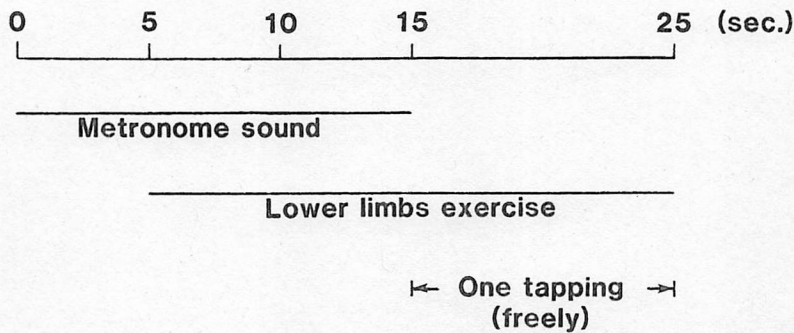


Fig. 3 Experimental schedule

ム音を聞かせた。続いてメトロノーム音に合わせて10秒間下肢の運動を行わせた。さらに続けてメトロノーム音のない条件下で10秒間下肢の運動を継続させた。上肢の運動を組み合わせる場合は、このメトロノーム音のない条件下の下肢運動中に、被験者の自由なタイミングで上肢のタッピングを1回行わせた。図4は上肢と下肢の接地タイミングを把握するため、被験者の左右両手掌と左右両脚の母指球から小指球にかけて取りつけた自作のスイッチである。このスイッチにより、接地時に1.5Vの電圧を発生させた。

測定項目は上肢と下肢の接地タイミングであり、これらをメトロノーム音と共にデーターレ

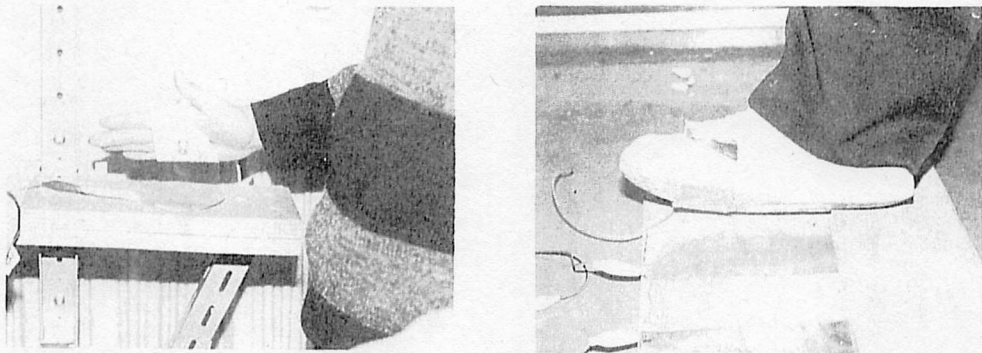


Fig. 4 Switches of palms and feet

コーダーに記録した。テープスピードは 0.95cm/sec. とした。分析はデーターを A/D コンバーター（分解能12ビット）を介してパーソナル・コンピューターに取り込んで行った。サンプリング・クロックは 10msec. とした。計測した内容は一方の脚が接地してから他方の脚が接地するまでの時間（以下、ステップ・インターバルとする）と、上肢タッピングが行われた時間である。なお、メトロノーム音に合わせて下肢運動を行うのに数秒の時間を要すると考え、最初の5秒間のデーターは分析の対象から除いた。

統計処理上の検定基準は危険率5%未満をもって有意とした。

III 結 果

1) 足ぶみ運動と底屈運動の比較

図5に足ぶみ運動と底屈運動におけるステップ・インターバルの変動の1例を示した。縦軸のステップ・インターバルのスケールは、どのテンポの下肢運動も設定したテンポの時間間隔に対し同じ割合で示した。横軸はステップである。図中の前半はメトロノーム音に合わせて行った下肢運動の8ステップである。最初のステップは右脚接地から左脚接地まで（以下、右脚→左脚とする）、次のステップは左脚接地から右脚接地まで（以下、左脚→右脚とする）のものであり、以降この繰り返しである。図中の後半はその後メトロノーム音を聞かずに行った下肢運動の13ステップである。図に示されているように、足ぶみ運動、底屈運動ともにステップ・インターバルは周期的に変動し、右脚→左脚と左脚→右脚の値が異なる傾向にある。また、足ぶみ運動に比較して、底屈運動のステップ・インターバルは幾分大きく変動している。この2つの傾向はすべての被験者に認められた。被験者ごとに右脚→左脚と左脚→右脚のステップ・インターバルについて差の検定を行った結果、7名中6名に有意差が認められた。足ぶみ運動

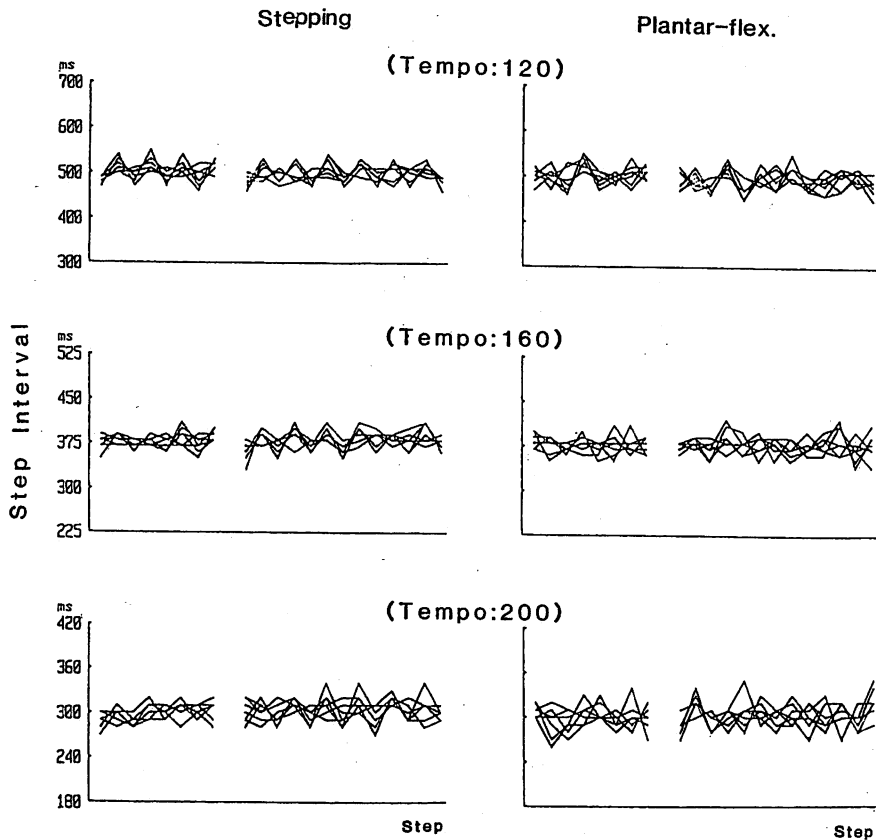


Fig. 5 Example of the changes of step intervals on the stepping exercise and the plantar-flexion without hand tapping (subject : Y. Y.)

と底屈運動におけるステップ・インターバルの変動の大きさの違いを検討するために、設定したテンポの時間間隔と測定で得られたステップ・インターバルとの時間差（絶対値）を求めた。図6に被験者ごとの足ふみ運動と底屈運動の時間差を、7回の測定の平均値で示した。どの図も縦軸の時間差のスケールは、設定したテンポの時間間隔に対し同じ割合で示した。図に示されているように足ふみ運動に比較して、底屈運動の時間差が大きくなる者が多く、120テンポでは3名、160テンポでは5名、200テンポでは4名に有意差が認められた。

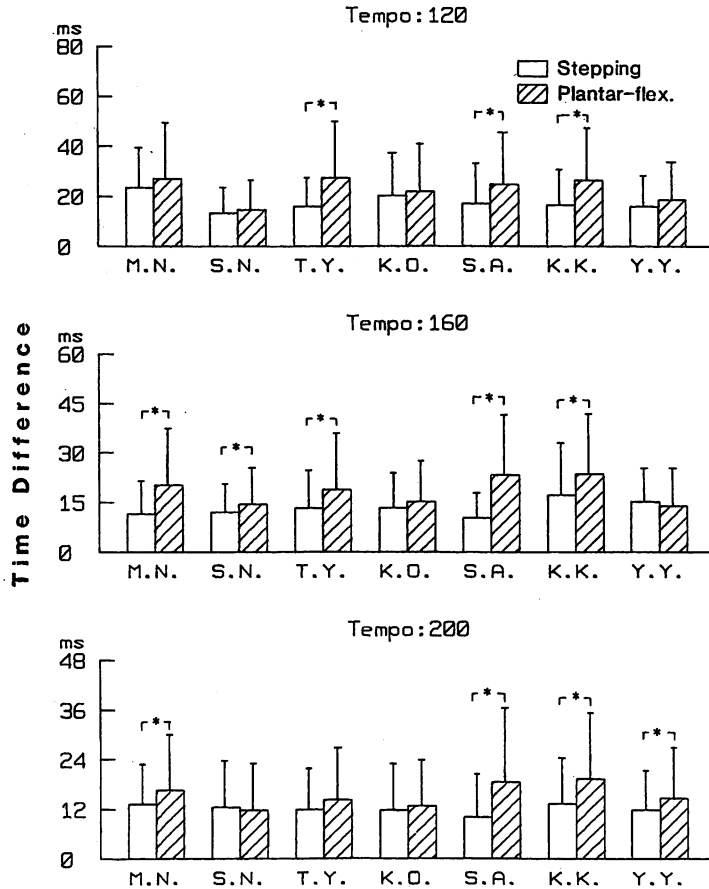


Fig. 6 Comparison of mean time differences on the stepping exercise and the Plantar-flexion without hand tapping. The time differences were calculated from actual step intervals and theoretical step intervals. (*p<.05)

2) 足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動の比較

図7に足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動におけるステップ・インターバルの変動の1例を示した。被験者は図5で示した者と同じである。上肢のタッピングを行った時点が含まれるステップ（以下、タッピング時ステップとする）は矢印で示し、メトロノーム音を

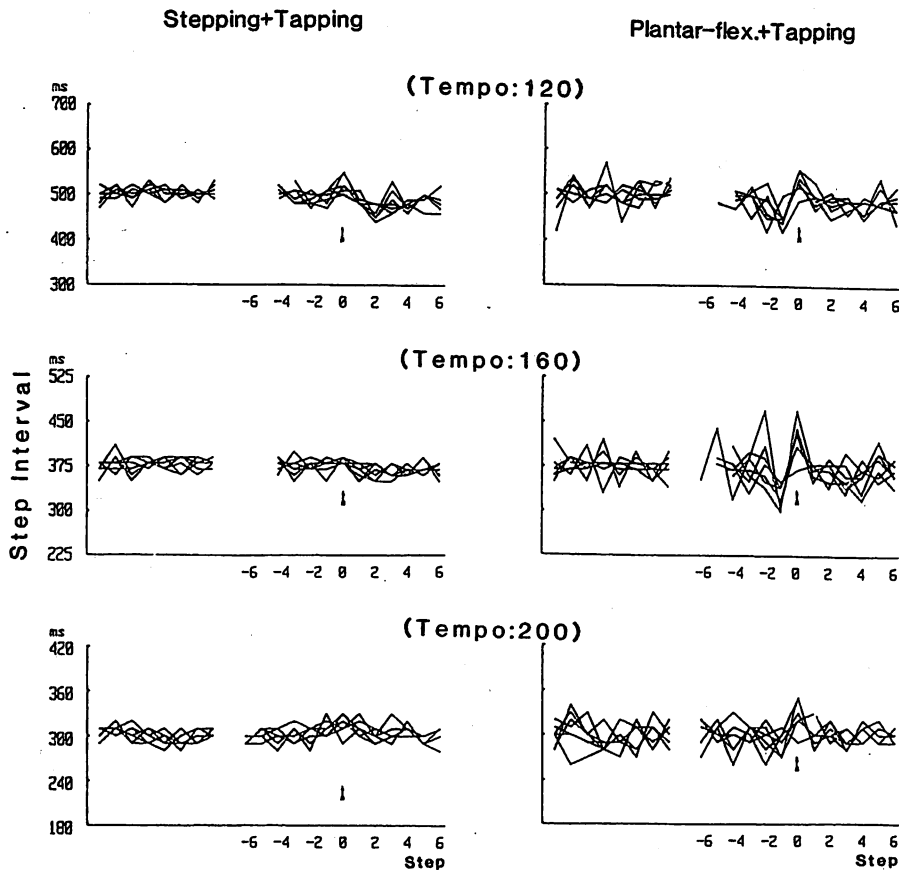


Fig. 7 Example of the changes of step intervals on the stepping exercise and the plantar-flexion with hand tapping (subject : Y. Y.). An arrow mark shows the enforcement of hand tapping.

聞かずに行った下肢運動のステップはその前後6ステップを示した。足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動はいずれもタッピング時ステップのインターバルの変動が大きくなっている。しかし両者を比較すると、底屈・タッピング運動の変動が著しく大きい。図8に120テンポの下肢運動におけるステップ・インターバルの変動を、被験者ごとに7回の測定の平均値で示した。同様に160テンポと200テンポの結果を図9、図10に示した。どのテンポでも、多くの被験者は上肢タッピングを底屈運動に組み合わせた場合のステップ・インターバルの変動が大きい。そしてこの変動に共通している事として、タッピング時ステップのインターバルが長くなり、その1ステップ前のインターバルが短くなっている事があげられる。そこでこの2つのステップ・インターバルについて足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動の比較を行った。本研究の下肢運動は連続する2ステップで1周期と考えることができる。そこでまず、足ふみ運動と底屈運動の連続する2ステップの合計の平均値を求め、1周期に要する時間（以下、1周期時間とする）の基準値とした。足ふみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動ではタッピング時ステップとその1ステップ前のインターバルの合計値を求めた。そして1

(Tempo:120)

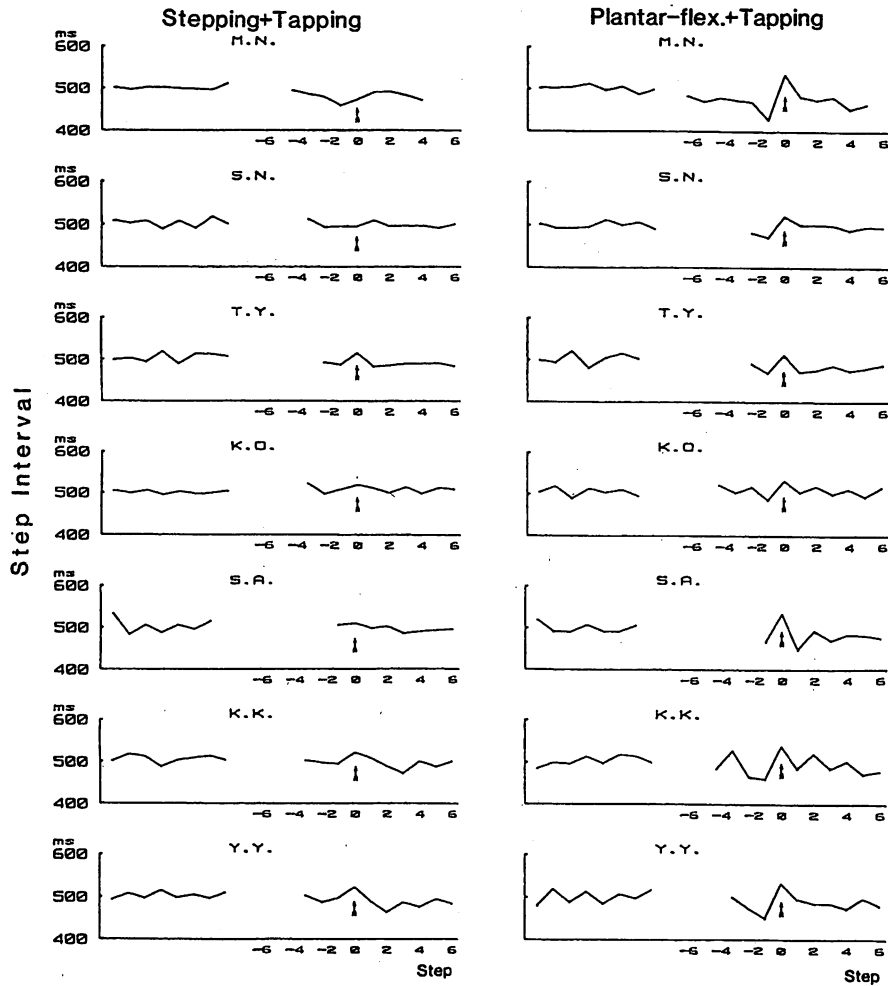


Fig. 8 Changes of mean step intervals on the stepping exercise and the plantar-flexion with hand tapping (tempo : 120). An arrow mark shows the enforcement of hand tapping.

周期時間の基準値に対するこの値の比を足ぶみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動とで比較した。その結果、120テンポと160テンポでは7名すべてに、200テンポでは被験者 S. A. を除き6名に有意差が認められなかった。有意差の認められた被験者 S. A. の結果は、足ぶみ・タッピング運動に比べて底屈・タッピング運動におけるタッピング挿入時の1周期時間が延長しているというものであった。次に上肢タッピングの挿入される1ステップ前のインターバルに対するタッピング時ステップのインターバルの比（以下、インターバル比とする）を求め、足ぶみ・タッピング運動と底屈・タッピング運動とを比較した。その結果、足ぶみ・タッピン

(Tempo:160)

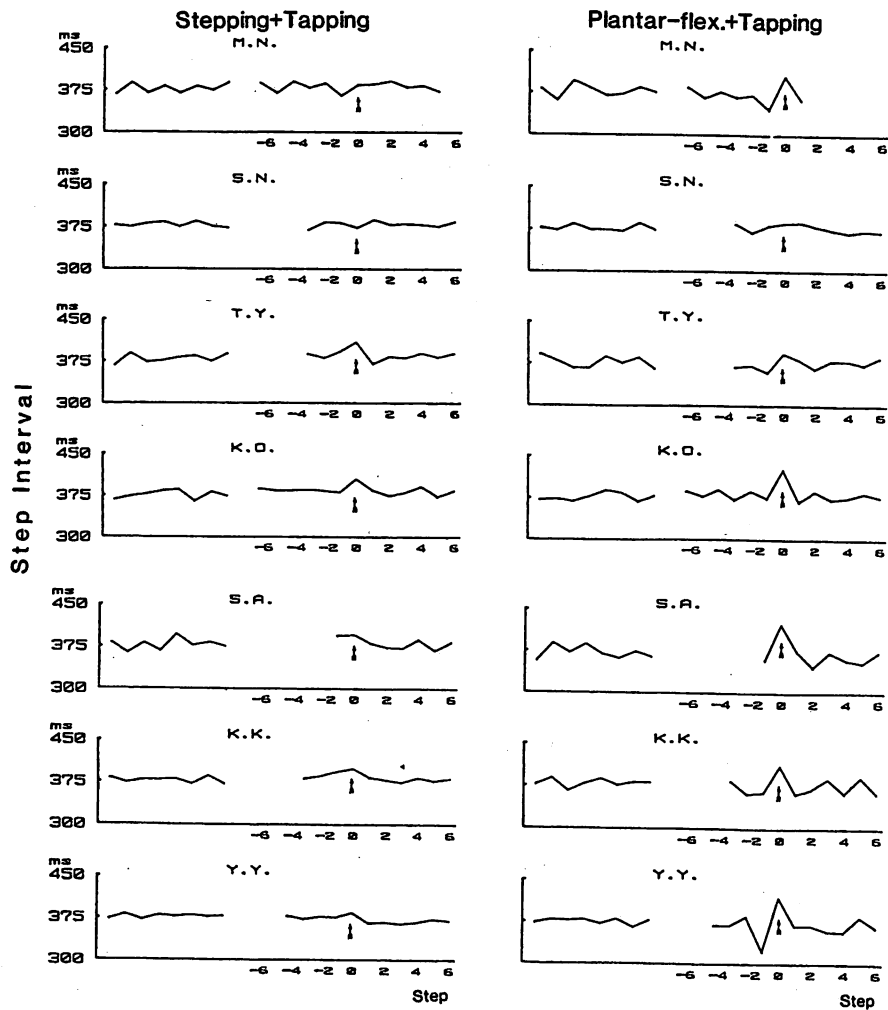


Fig. 9 Changes of mean step intervals on the stepping exercise and the plantar-flexion with hand tapping (tempo : 160). An arrow mark shows the enforcement of hand tapping.

グ運動に比べて底屈・タッピング運動におけるインターバル比が大きい傾向が7名すべての被験者に認められ、検定の結果120テンポでは4名、160テンポでは3名、200テンポでは4名に有意差が認められた。この中には底屈・タッピング運動におけるタッピング挿入時の1周期時間が有意に長くなっていた被験者S. A. も含まれている。

(Tempo:200)

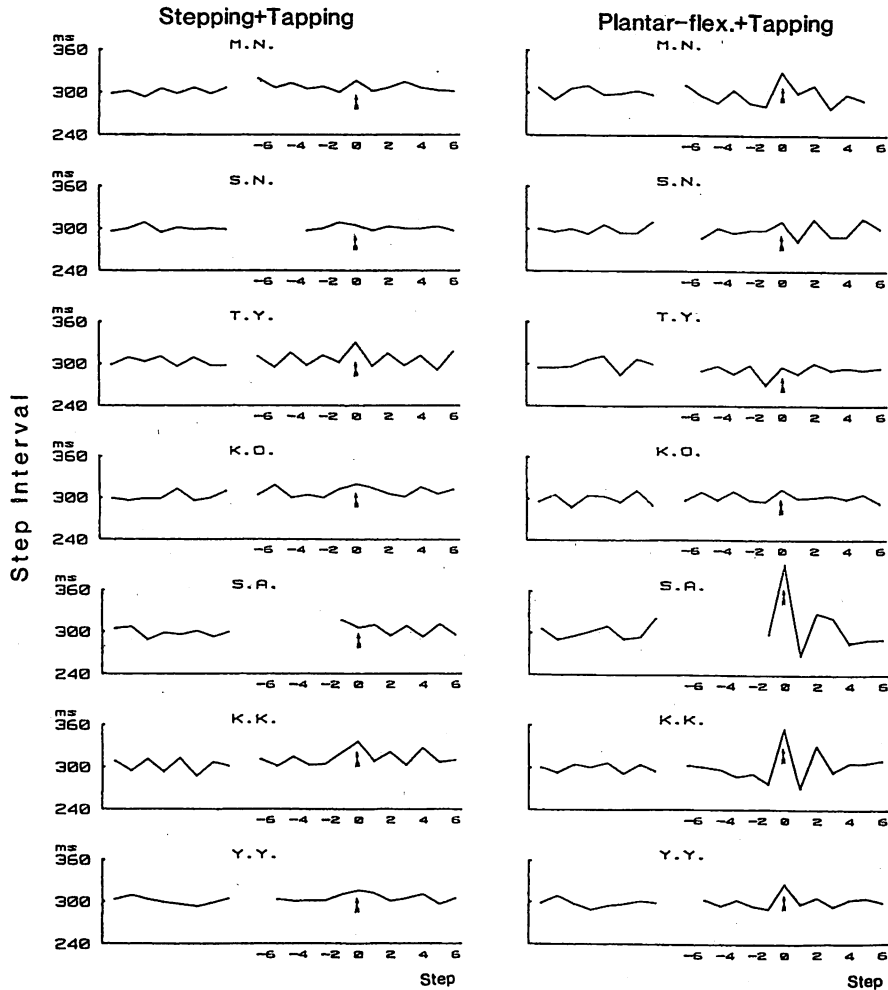


Fig. 10 Changes of mean step intervals on the stepping exercise and the plantar-flexion with hand tapping (tempo : 200). An arrow mark shows the enforcement of hand tapping.

IV 考 察

運動にはかなり意識を集中して行わなければ実行することが困難なものと、意識を集中しなくても実行できるものとがある。バリスティックな運動でないかぎり、運動を行っている場合には行った運動の結果を体性感覚としてフィードバックし、運動の調節がなされている。体性感覚がより上位の中枢で使われた場合は運動の結果が知覚され、次に実行する運動を随意的に

調節することになる。一方、下位の中枢で体性感覚が使われた場合は運動の結果が知覚されず、反射的に運動の調節をすることになる。しかし、この場合でも運動の結果を知覚し、意識的に運動を調節することが必要な場合には、上位の中枢で体性感覚を使用して随意的に運動を調節することができる。このように体性感覚の使用の仕方が変動することは Evarts と丹治³⁾によって示されている。したがってより自動化された運動とは、運動の結果を知覚して随意的に調節する割合が少なくとも正確に実行することが可能な運動であり、より自動化されていない運動とは、頻繁に運動の結果を知覚して随意的な調節をしなければならない運動といえる。反射による運動の調節といった単純なものにも階層性があることから¹⁷⁾、随意運動に伴う体性感覚を処理する中枢にも階層性がある事は容易に推察できる。そして藤原ら⁴⁾は開眼時と閉眼時における姿勢調節学習の転移の違いを中枢の階層性から考察している。すなわち、上位中枢で使われる視覚情報のある条件下（開眼）で学習した姿勢調節能力は、視覚情報がなく（閉眼）下位の中枢で姿勢を調節する能力に転移するが、その逆の学習の転移が成立しなかったことに中枢の階層性があることを推察している。

本研究の足ぶみ運動と底屈運動におけるステップ・インターバルを比較した場合に底屈運動の変動が大きいという結果は、この2つの運動の体性感覚が異なるレベルの中枢で使用されて運動の調節が行われていたことを示すと考えられる。なぜならば、中枢は格子階層構造をもつと考えられ¹⁴⁾、下位の中枢が中心となって体性感覚にもとづく運動調節を行う場合には、その調節は下位の中枢の決定に依存するので比較的単純であるが、上位の中枢が中心となって運動の調節を行う場合には、上位中枢の決定が下位中枢の決定を修飾するので調節は複雑で多様なものとなることが推察できる。したがって、底屈運動の場合にステップ・インターバルの変動が大きかったことは体性感覚が足ぶみ運動に比べて上位の中枢で使用され、多様な調節がなされていたことを示すものと考えられる。このことから足ぶみ運動に比べて底屈運動はより自動化されていない運動であることが推察できる。このような下肢運動の自動化水準の違いは、下肢の運動に上肢の運動を組み合わせると自動化水準の低い底屈運動のテンポが大きく乱れるというように、下肢運動のテンポに対する干渉の程度の違いとして一層顕著に表われた。よって、下肢運動の自動化水準は上肢運動を組み合わせた場合の下肢運動のテンポの乱れから評価することが可能と思われる。

下肢運動に対する上肢運動の干渉のしかたは下肢運動のテンポの変動パターンから推察することができる。足ぶみ・タッピング運動に比べて底屈・タッピング運動におけるタッピング挿入時のインターバル比が大きくなるという結果は、タッピングを行なう直前の下肢の接地動作が早く行われるという現象が底屈運動で顕著である事を示している。この現象は上肢タッピングを開始する意識的な準備 (motor set) が随意的な下肢運動の調節にも影響を及ぼしたと考えることができる。一方、体性感覚が知覚されず、反射的な下肢運動の調節が中心となっている足ぶみ運動では実際のテンポの乱れは小さかったと考えられる。

本実験の結果で、タッピング挿入時のインターバル比の変動に加え、1周期時間も大きく変動した被験者が1名いた（被験者 S. A.）。筆者はこの被験者が体育実技において種々の運動をうまく行えない者であることを観察している。また、本人もこれまで多くのスポーツが苦手で

あった事を告げていた。この事例からは上肢と下肢の組み合わせ運動を調節する能力がスポーツ技術の学習能力の1側面であることが推察される。

今回得られた結果から考えられる下肢運動に上肢運動を組み合わせた場合の運動プログラムのモデルを図11に示した。矢印の太さは情報量と運動の調節に占める役割の大きさを示している。自動化されている下肢運動(A)では、下肢筋を中心とする体性感覚の大部分が脊髄と大脳皮質より下位の中樞を介したループで処理され、運動調節は知覚されず反射的に行なわれている。上肢運動を行う場合、大脳皮質で生じる上肢運動の実行のための指令が下肢運動の調節の中で大脳皮質を介する随意的な調節ループに干渉する(図中の☆印)。しかし、この大脳皮質を介しての調節が下肢運動の調節全体に占める役割は小さいので、下肢運動の乱れは少ない。一方、自動化されていない下肢運動(B)では、下肢運動の調節の大部分が上位中枢である大脳皮質を介したループで行われている。上肢運動を行うために大脳皮質で生じた上肢のための指令が下肢運動の調節の中で大脳皮質を介する随意的な調節ループに干渉する程度は自動化されている下肢運動の場合と同じである。しかし、下肢運動の調節全体に占めるこのループの役割が大きいのので干渉による影響は大きくなる。このようなモデルに加えて、上肢運動のための指令が上位と下位の中樞に干渉する程度が変化することや、上肢と下肢の運動を組み合わせた場合に個々の運動プログラム自体が変化することを含めて、今後さらに検討しなければならない。

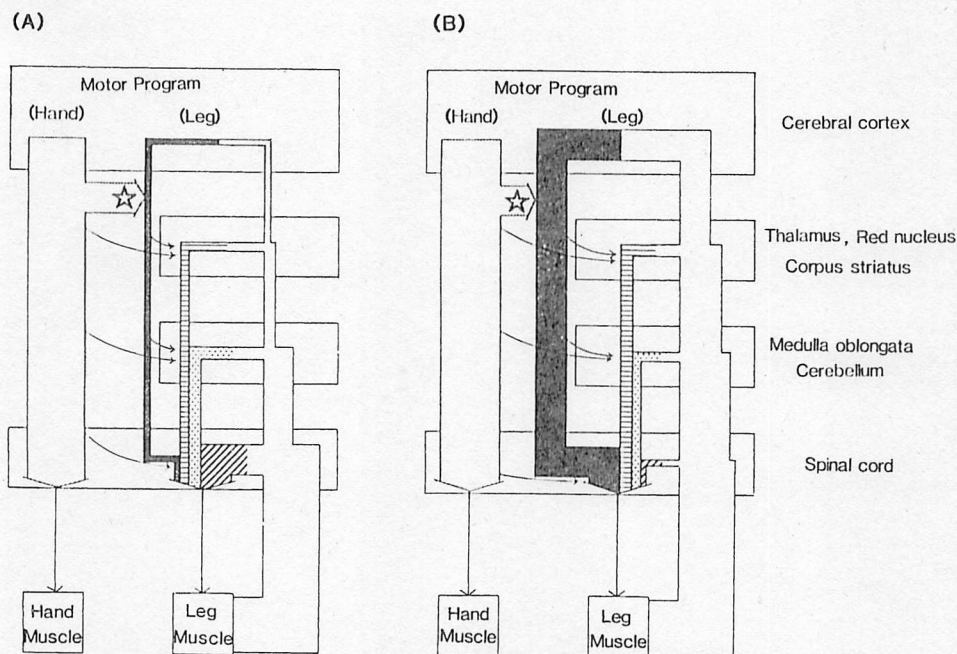


Fig. 11 Motor control model of the lower limbs exercise with the upper limbs exercise. Left column model (A) is for the automatic lower limbs exercise. Right column model (B) is for the non-automatic lower limbs exercise. A star mark shows the interference of the upper limbs motor program to the lower limbs motor program.

V ま と め

1. 下肢の運動として行った足ふみ運動と底屈運動のテンポの変動は底屈運動で大きく、底屈運動の自動化水準は足ふみ運動に比べて低いと考えられた。

2. 下肢運動に上肢運動を組み合わせた場合の下肢運動のテンポに対する干渉の程度は底屈運動で顕著であり、下肢運動の自動化水準を上肢運動を組み合わせることで評価することが可能であると推察された。

3. 上肢運動を組み合わせた場合の下肢運動のテンポの変動パターンから、下肢運動に上肢運動を組み合わせた場合の運動プログラムのモデルを検討した。

引 用 文 献

- 1) Corcos, D. M. (1984) Two-handed movement control. *Research Quarterly*, 55 (2) : 117-122
- 2) Di Stefano, M., Morelli, M., Marzi, C. A. and Berlucchi, G. (1980) Hemispheric control of unilateral and bilateral movements of proximal and distal parts of the arm as inferred from simple reaction time to lateralized light stimuli in man. *Exp. Brain Res.*, 38 : 197-204
- 3) Evarts, E. V. and Tanji, J. (1974) Gating of motor cortex reflexes by prior instruction. *Brain Res.*, 71 : 479-494
- 4) 藤原勝夫, 中野綾子, 池上晴夫, 幸山彰一 (1988) 水平床振動を繰り返し負荷した場合の立位姿勢調節の変化, *体力科学*, 37 : 25-36
- 5) Gazzaniga, M. S. and Sperry, R. W. (1966) Simultaneous double discrimination response following brain bisection. *Psychon. Sci.*, 4 (7) : 261-262
- 6) Kelso, J. A. S., Southard, D. L. and Goodman, D. (1979) On the coordination of two-handed movement. *J. Experi. Psychol.*, 5 (2) : 229-238
- 7) Kelso, J. A. S., Southard, D. L. and Goodman, D. (1979) On the nature of human interlimb coordination. *Science*, 203 (9) : 1029-1031
- 8) Lund, J. P. and Olsson, K. A. (1983) The importance of reflexes and their control during jaw movement. *Trends Neurosci.*, 6 : 458-463
- 9) Luschei, E. S. and Goodwin, G. M. (1975) Role of monkey precentral cortex in control of voluntary jaw movements. *J. Neurophysiol.*, 38 : 146-157
- 10) Nakamura, R., Taniguchi, R. and Oshima, Y. (1975) Synchronization error in bilateral simultaneous flexion of elbows. *Percept. Motor Skills*, 40 : 527-532
- 11) 中村隆一 (1981) 中枢性運動障害の機能回復—リハビリテーションの立場から—, *神経進歩*, 25 : 1261-1270
- 12) Ohtsuki, T. (1980) Decrease in grip strength induced by simultaneous bilateral exertion with reference to finger strength. *Ergonomics*, 24 (1) : 37-48
- 13) Ohtsuki, T. (1980) Decrease in human voluntary isometric arm strength induced by

- simultaneous bilateral exertion. *Behavio. Brain Res.*, 7 : 165-178
- 14) Rube, N., Secher, N. H. and Lodberg, F. (1980) The effects of habituation and training on two and one leg extension strength. *Acta Physiol. Scand.*, 108 : 8a
 - 15) Secher, N. H. (1975) Isometric rowing strength of experienced and inexperienced oarsman. *Med. Sci. Sports*, 7 (4) : 280-283
 - 16) Secher, N. H., Rorsgaard, S. and Secher, O. (1978) Contralateral influence on recruitment of curarized muscle fibers during maximal voluntary extension of the legs. *Acta Physiol. Scand.*, 103 : 456-462
 - 17) Tatton, W. H., Forner, S. D., Gerstein, G. L., Chambers, W. W. and Liu, C. N. (1975) The effect of postcentral cortical lesions on motor responses to sudden limb displacements in monkey. *Brain Res.*, 96 : 108-113
 - 18) Vandervoort, A. A., Sale, D. G. and Moroz, J. (1984) Comparison of motor unit activation during unilateral and bilateral leg extension. *J. Appl. Physiol.*, 56 (1) : 46-51